

УДК 520.2:520.82+528.5-52

РОВОРНТ: 60-СМ РОБОТ-ТЕЛЕСКОП КОУРОВСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ УРФУ

© 2025 Н. А. Чазов^{1*}, Д. Д. Терешин¹, В. В. Крушинский², А. А. Попов¹, А. О. Землина¹¹Коуровская астрономическая обсерватория им. К. А. Бархатовой Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, 620000 Россия²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, 620002 Россия

Поступила в редакцию 23 августа 2024 года; после доработки 24 марта 2025 года; принята к публикации 23 июня 2025 года

Представлены результаты разработки и ввода в эксплуатацию 60-см телескопа RoboPhot Коуровской астрономической обсерватории, оснащенного трехканальным фотометром TRIP (Three-channel RoboPhot Imaging Photometer). Фотометр разработан для одновременного получения изображений в трех диапазонах фотометрической системы SDSS: g , r и i . В настоящий момент он оснащен только двумя ПЗС-камерами с разрешением 2048×2048 пикселей, полем зрения $22' \times 22'$ и масштабом изображения $0''.65$ на пиксель. Основная задача телескопа — высокоточная многоцветная дифференциальная фотометрия астероидов и переменных звезд, в частности транзитов экзопланет. Для звезд 13^m 5 точность (СКО) дифференциальной фотометрии на уровне 2.5 ppt в звездных величинах достигается за экспозицию продолжительностью 120 с. Ожидается, что телескоп станет ведущим инструментом Коуровской обсерватории по изучению экзопланет и внесет свой вклад в исследовательскую программу TESS.

Ключевые слова: телескопы — приборы: фотометры — экзопланеты

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование экзопланет является активно развивающимся направлением современной науки. Главным методом поиска и исследования экзопланетных систем является метод транзитной фотометрии. Этот метод прост и относительно доступен, что позволяет небольшим наземным обсерваториям эффективно участвовать в программах наблюдений экзопланет. Транзиты позволяют оценить много важных параметров экзопланеты: массу, радиус, плотность, наклон орбит и состав атмосферы.

Отдельно стоит упомянуть, что востребованность наземных наблюдений растет в силу огромного количества кандидатов в экзопланетные системы (Vach et al., 2024), выявленных при помощи таких инструментов как TESS¹ (Ricker et al., 2014). С целью участия в международных проектах по поиску и исследованию экзопланет в Коуровской астрономической обсерватории был разработан и установлен фотометрический телескоп RoboPhot (Potoskuev et al., 2020).

На этапе проектирования мы хотели удовлетворить следующим требованиям к телескопу: одновременные наблюдения как минимум в трех полосах фотометрической системы SDSS, возможность автоматизации наблюдений и обработки полученных данных, фокусное расстояние телескопа в диапазоне 3–5 м, поле зрения в диапазоне 15–30 угловых минут, минимум подвижных элементов в конструкции. Требования вытекают из желания эффективно использовать инструмент в условиях посредственного астроклимата Коуровской обсерватории, иметь возможность наблюдать звезды ярче 14^m с высоким S/N и повысить надежность работы телескопа в условиях низких температур.

2. КОУРОВСКАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

Коуровская астрономическая обсерватория (КАО) расположена в Свердловской области в 80 км к западу от г. Екатеринбурга. Координаты обсерватории: $57^{\circ}02'11''$ с.ш., $03^h58^m10^s$ ($59^{\circ}32'30''$) в.д., 290 м над уровнем моря.

По данным установленных в обсерватории датчиков облачности и seeing-монитора за

*E-mail: nikita.chazov@urfu.ru

¹The Transiting Exoplanet Survey Satellite

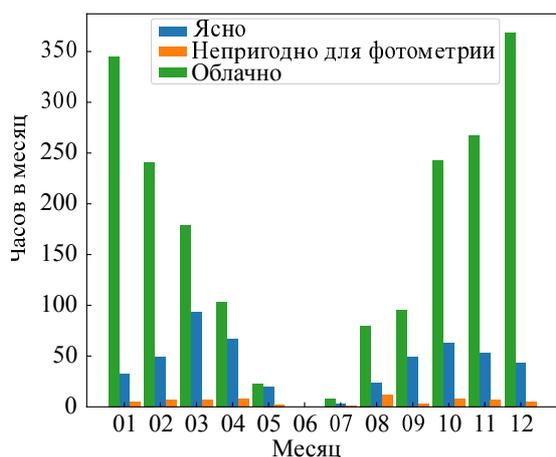


Рис. 1. Гистограмма распределения ночного времени в КАО в часах от месяца года. Синим цветом показано ясное темное время, оранжевым — ясное время с высокими редкими облаками, зеленым — облачные часы.

2018–2022 годы, среднее количество пригодного для астрономических наблюдений времени составляет 558 часов в год (рис. 1). Средний seeing (угловые размеры изображений звезд в зените, обусловленные влиянием атмосферной турбулентности) за указанный период составил 2"5. При этом в 70% наблюдательного времени параметр seeing лучше 3", и в 8% лучше 1"5 (рис. 2). Средний медианный фон неба для всех темных ясных ночей в КАО составляет 18.8 $V_{\text{mag}} \text{ arcsec}^{-2}$ (рис. 3).

Наблюдательный сезон в КАО длится с августа по май. С июня по июль наблюдения не проводятся, так как ночи короткие и недостаточно темные для полноценных наблюдений. Период с ноября по февраль соответствует максимуму темного времени, но также и минимуму ясных ночей (менее 10 ночей в месяц). Кроме того, в зимние месяцы температура воздуха в ночное время нередко снижается до -30°C . Разница между дневной и ночной температурами достигает 10°C в ясную погоду, что приводит к нагреву телескопа в дневное время и снижению качества изображения из-за локальных потоков теплого воздуха.

Дефицит ясного темного времени, высокий фон неба и посредственный seeing сужают круг возможных наблюдательных задач для КАО, по сути ограничивая их фотометрией звезд ярче $16^{\text{m}}-17^{\text{m}}$ и спектроскопией высокого разрешения. При этом автоматизация наблюдений позволяет эффективнее использовать ясное время.

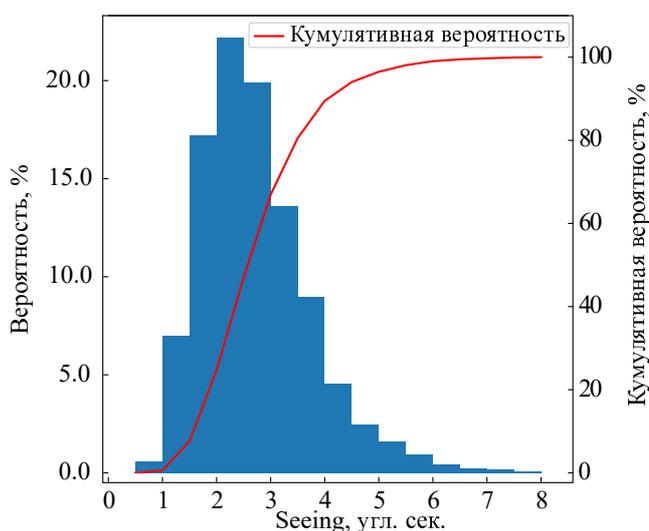


Рис. 2. Гистограмма распределения параметра seeing в КАО.

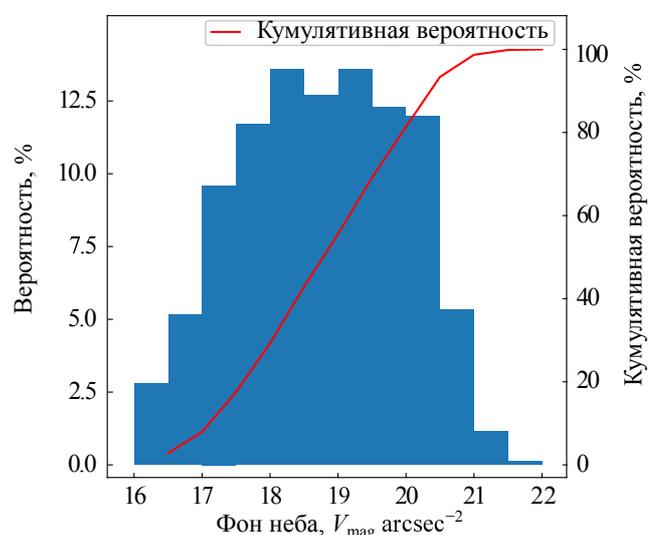


Рис. 3. Гистограмма распределения значения фона неба в КАО.

3. ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ДИЗАЙН ТЕЛЕСКОПА

3.1. Телескоп и купол

Оптическая труба и монтировка телескопа были разработаны и изготовлены компанией ARM Telescopes.

Труба телескопа RoboPhot построена по оптической схеме Долла–Кирхема с предфокальным двухлинзовым корректором. Диаметр главного зеркала составляет 60 см, фокусное расстояние системы — 4.2 м, относительное отверстие — 1/7. Фокусировка осуществляется за счет подвижного вторичного зеркала. В оправе главного зеркала установлены вентиляторы для снижения влияния потоков воздуха от теплого главного зеркала телескопа на качество изображения.

Оптическая труба установлена на экваториальной монтировке немецкого типа APM GE-300DD. Монтировка с прямыми приводами снабжена абсолютными энкодерами производства фирмы Renishaw. В соответствии со спецификацией производителя точность наведения (среднеквадратическое отклонение) составляет $15''$, ошибка часового ведения — менее $0''2$ за 300 с, максимальная скорость наведения — 12° в секунду. Управление монтировкой осуществляется с помощью контроллера Force One Brushless Controller, изготовленного фирмой Sidereal Technology². Контроллер поддерживает работу с компьютерами под управлением ОС Windows и Linux.

Купол телескопа типа clamshell диаметром 3.6 м. Управление куполом и механизмом фокусировки телескопа осуществляется с помощью разработанных нами контроллеров на основе микроконтроллеров Atmel.

3.2. Трехканальный фотометр TRIP

Трехканальный фотометр TRIP (Three-channel RoboPhot Imaging Photometer) разработан и изготовлен в КАО. Конструкция фотометра показана на рис. 4. Идея использовать скрещенную установку дихроичных зеркал для компенсации астигматизма заимствована у прибора BUSCA (Bonn University Simultaneous CAmera) (Reif et al., 1999). Моделирование показало, что для телескопа с умеренным относительным отверстием ($1/7$) остаточный астигматизм, вносимый скрещенными дихроичными зеркалами фотометра, существенно меньше типичного значения seeing для КАО, при этом 85% энергии будет содержаться в пятне радиусом $1''$. Таким образом, качество изображения на поле $30 \times 30 \text{ мм}^2$ будет ограничено только состоянием атмосферы и точностью юстировки телескопа. TRIP не содержит подвижных элементов, что значительно повышает его надежность.

В фотометре используются два плоскопараллельных дихроичных зеркала размером $100 \times 70 \text{ мм}$ и толщиной $7 \pm 0.1 \text{ мм}$. Длина волны разделения равна 547 нм для зеркала $g/r + i$ и 682 нм для зеркала r/i . Для компенсации астигматизма в канале r используется прозрачная плоскопараллельная пластина, изготовленная из стекла той же марки, что и дихроичные зеркала, с такими же размерами и антиотражающим покрытием, оптимизированным для полосы r .

Непосредственно перед затвором каждой из трех ПЗС-камер фотометра установлены фильтры g , r и i фотометрической системы SDSS. Все

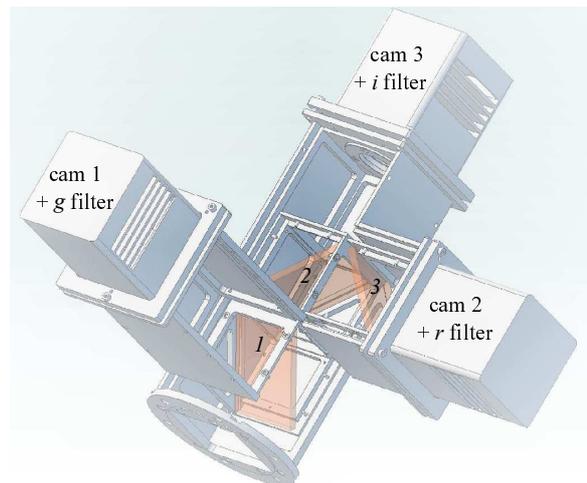


Рис. 4. Модель TRIP. На рисунке обозначены камеры, фильтры и дихроичные зеркала. Цифрой 1 указано дихроичное зеркало $g/r/i$, цифрой 2 — дихроичное зеркало r/i , цифрой 3 — прозрачная пластина, предназначенная для компенсации астигматизма, вызванного прохождением света через первое дихроичное зеркало.

оптические элементы TRIP были изготовлены фирмой Asahi Spectra³. Для фотометра были приобретены три ПЗС-камеры FLI ML4240 MB производства Finger Lakes Instrumentation⁴. Вследствие поломки одной из камер сейчас на фотометре установлены только камеры для полос r и i , более предпочтительных для наблюдения транзитов экзопланет у звезд поздних спектральных классов. В камерах используется ПЗС e2v CCD42-40. Шум считывания камер равен $8.3 e^- \text{ пиксель}^{-1}$, коэффициент преобразования — $1.4 e^- \text{ ADU}^{-1}$, темновой ток составляет $0.2 e^- \text{ пиксель}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при температуре ПЗС -30° C . Камеры обеспечивают поле зрения $22' \times 22'$ при масштабе изображения $0''65$ на пиксель. Разработанное нами программное обеспечение позволяет синхронно управлять тремя камерами фотометра.

Эффективность отдельных элементов TRIP и полная эффективность для каждого канала фотометра в зависимости от длины волны показаны на рис. 5.

4. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕЛЕСКОПА РОБОФТОТ

По согласованию с производителем телескоп RoboPhot поставлялся с программным пакетом RTS2 (Remote Telescope System, 2nd Version) (Kubánek et al., 2004), работающим в

²<https://www.siderealtechnology.com/>

³<https://www.asahi-spectra.com>

⁴<https://www.flicamera.com/index.html>

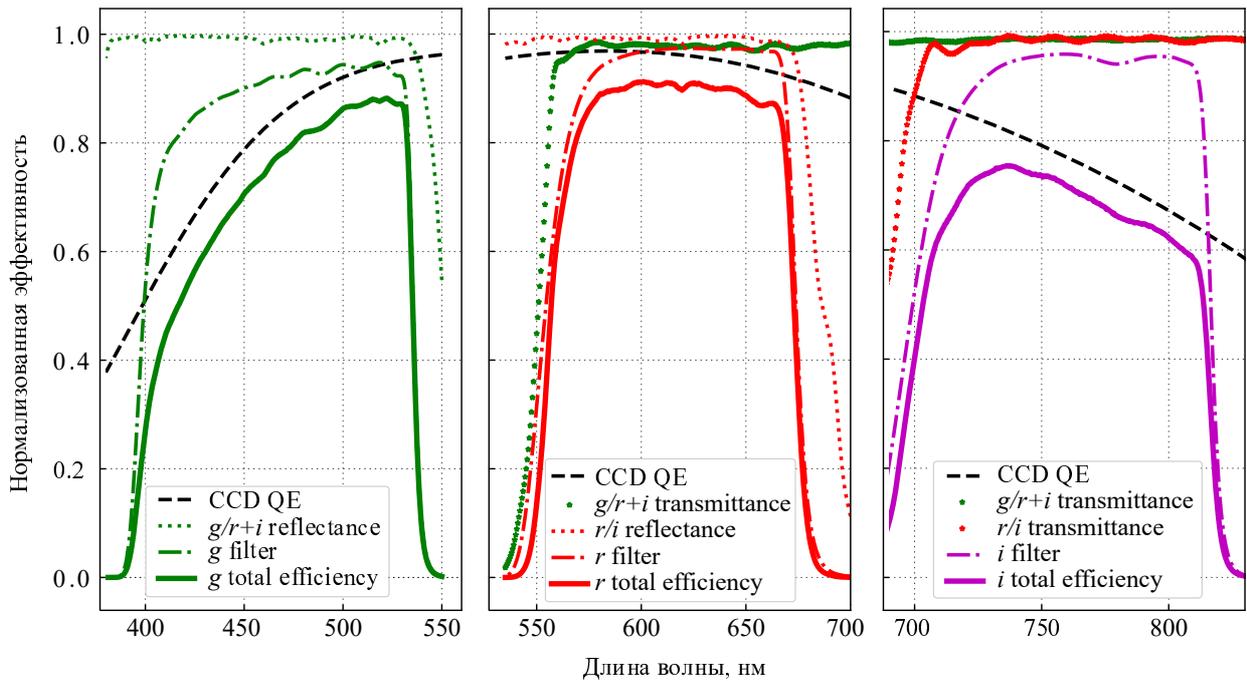


Рис. 5. Эффективность отдельных элементов TRIP и полная эффективность каждого канала фотометра в зависимости от длины волны. Сплошная линия показывает полную эффективность системы в каждом фильтре. Черная штриховая линия показывает квантовую эффективность ПЗС-матрицы. Штрихпунктирная линия показывает пропускающую способность каждого фильтра. Пунктирная линия обозначает отражающую способность, а звездочки — пропускающую способность каждого дихрлического зеркала.

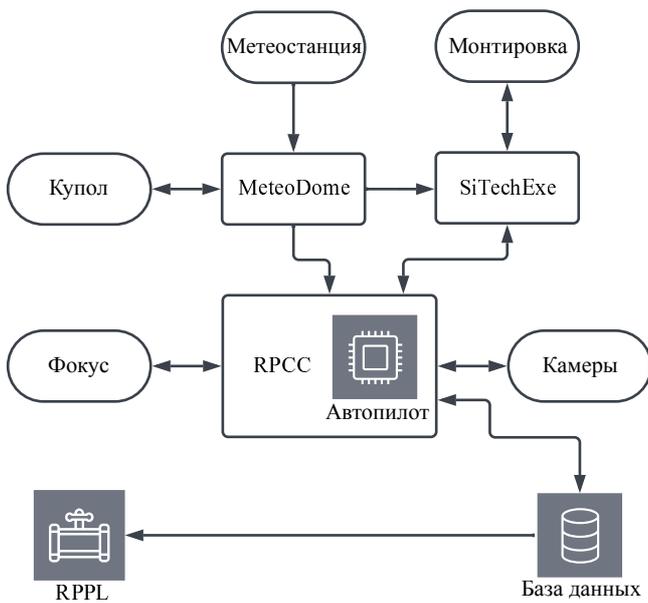


Рис. 6. Блок-схема систем управления телескопом и обработки данных. Прямоугольниками обозначены программы управления, овалами — механические узлы телескопа. Графически выделены основные элементы, обеспечивающие автоматизацию работы телескопа.

квалификации, что затрудняет работу с телескопом для большинства потенциальных пользователей. Кроме того, поддержка RTS2 для России была прекращена в 2022 году. Поэтому нами было принято решение о разработке собственной системы управления RoboPhot. Мы не ставили задачу написать универсальный пакет для решения широкого круга задач и управления различными телескопами и оборудованием, что позволило существенно упростить код системы управления. Разработанный нами комплекс программ обладает графическим интерфейсом и работает в операционных системах семейства Windows, что позволяет снизить требуемый уровень подготовки наблюдателя.

Программный комплекс разработан с использованием языков программирования C# для платформы .NET Framework, Python3 и СУБД PostgreSQL. Архитектура системы управления схожа с архитектурой RTS2 и программным обеспечением телескопов сети MASTER (Kornilov et al., 2012). Для связи между отдельными программами используются TCP/IP-сокеты. Основные узлы программного комплекса и взаимосвязь между ними схематично изображены на рис. 6.

Ключевой элемент автоматизированной системы управления телескопом — программа MeteorDome, которая анализирует текущие погодные условия, осуществляет управление куполом

операционных системах семейства Linux. Использование и обслуживание RTS2 требует высокой

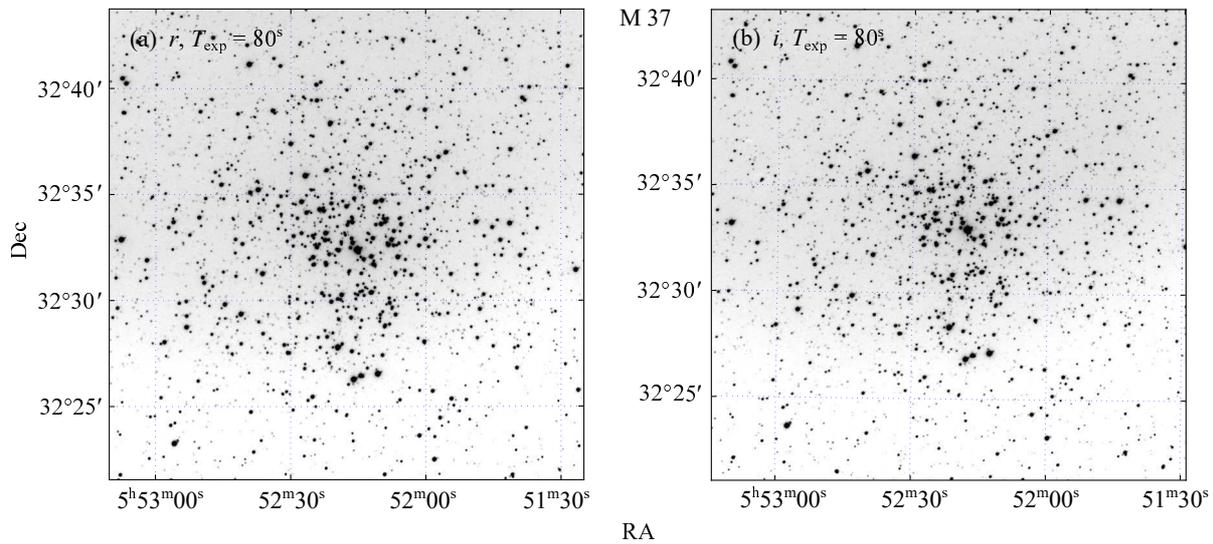


Рис. 7. Пример кадров, полученных на телескопе RoboPhot в полосах фильтров r (а) и i (б).

телескопа и принимает решение о начале или завершении наблюдений. Это решение по запросу сообщается остальным модулям системы управления.

Программа RPCC (RoboPhot Cameras Controls) отвечает за управление камерами фотометра, управление фокусирующим узлом телескопа и автоматическую фокусировку, планирование и выполнение наблюдательных задач, коррекцию гидирования монтировки телескопа, взаимодействие с базой данных, а также сохранение и базовый анализ получаемых изображений.

Отдельным модулем программы RPCC является скрипт DONUTS (McCormac et al., 2013), отвечающий за коррекцию гидирования телескопа. Метод основан на быстром преобразовании Фурье исследуемого и эталонного кадра.

Программа SiTechExe разработана компанией Sidereal Technology и предназначена для работы с устройствами компании, в том числе с контроллером монтировки Force One Brushless Controller, установленном на телескопе RoboPhot. SiTechExe отвечает за взаимодействие с монтировкой телескопа: отслеживание состояния и положения монтировки, часовое ведение, наведение, привязку к системе небесных координат и парковку телескопа.

База данных телескопа RoboPhot содержит информацию обо всех наблюдательных заданиях и полученных кадрах, как сырых, так и прошедших первичную обработку. База данных является одним из основных узлов, обеспечивающих автоматическую работу телескопа. На основе запрашиваемых из нее данных модуль RPCC формирует расписание работы телескопа в автоматическом режиме, а модуль RPPL выбирает оптимальные для калибровки кадры темнового и плоского поля.

Программа RPPL (RoboPhot PipeLine) отвечает за первичную калибровку получаемых кадров — последовательно выполняются учет тока смещения, темнового тока, плоского поля и нахождение астрометрического решения итогового кадра.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕЛЕСКОПА ROBOTHOT

Для оценки фотометрических свойств телескопа мы провели наблюдения рассеянного звездного скопления M 37 (NGC 2099), для звезд которого есть высокоточная фотометрия, полученная на 6.5-м телескопе обсерватории ММТ в ходе обзора с целью поиска транзитных экзопланет (Hartman et al., 2008).

Наши наблюдения M 37 проводились в ночь с 19 на 20 марта 2024 года в условиях хорошей прозрачности атмосферы; Луна была вблизи первой четверти. Наблюдения выполнялись с экспозицией 80 с, фактором бинирования 2 и температурой ПЗС-матрицы -30°C . Примеры кадров приведены на рис. 7. В каждом фильтре было получено 146 кадров, прошедших первичную обработку в программе RPPL; 125 кадров были признаны пригодными для дальнейшего анализа, остальные отброшены по тем или иным причинам, в основном из-за достижения монтировкой предела по высоте.

Из каталога Hartman et al. (2008) мы отобрали звезды ярче $17^{\text{m}}5$ в фильтре r и ярче 17^{m} в фильтре i . Также были исключены пары звезд с расстоянием между ними менее восьми пикселей ($10''$). В итоговый каталог для фотометрии в фильтре r вошло 972 источника, а в фильтре i — 945 источников.

Медианно усредненное по кадрам значение $FWHM$ (full width at half maximum или полная

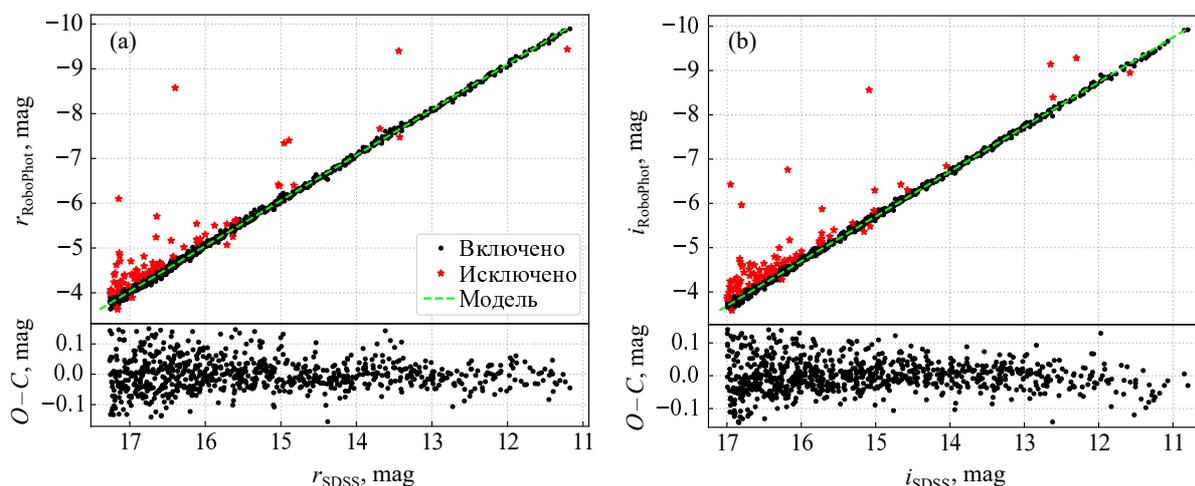


Рис. 8. Аппроксимация зависимости стандартных звездных величин SDSS от инструментальных для фильтров r (а) и i (б). Черными точками обозначены использованные для аппроксимации звезды, красными звездочками — исключенные звезды. Ярко-зеленая штриховая линия отображает итоговую линейную зависимость. В нижней части панелей (а) и (б) показана разность между наблюдениями и моделью для фильтров r и i соответственно.

ширина на середине максимума) ФРТ (функции рассеяния точки) источников равнялось 2.5 и 2.4 пикселя для фильтров r и i соответственно, что сопоставимо с усредненными показаниями seeing-монитора обсерватории в эту ночь.

Апертурная фотометрия была выполнена с использованием пакета `Photutils`⁵ для набора апертур с радиусами 1.7, 2, 2.5, 3 и 5 пикселей. Далее мы применили алгоритм ансамблевой дифференциальной фотометрии, описанный в статье Burdanov et al. (2014).

Оптимальный радиус фотометрической апертуры определялся по медианному значению СКО (среднеквадратическое отклонение) инструментальных звездных величин $\sigma(m)$ источников после обработки алгоритмом ансамблевой дифференциальной фотометрии. Минимальные ошибки фотометрии были получены для радиуса 2.5 пикселя, что соответствует $1 \times FWHM$ и согласуется с выводами Howell (2006).

5.1. Фотометрическая система телескопа

Строго говоря, фотометрическая система RoboPhot не эквивалентна фотометрической системе SDSS. Однако для звезд, не имеющих экстремальных показателей цвета и сильных эмиссионных линий в своих спектрах, поправки перехода между двумя системами будут малы и достаточно линейны (Tucker et al., 2006).

Результаты линейной аппроксимации зависимости звездных величин из каталога Hartman et al. (2008), калиброванного относительно каталога

⁵<https://photutils.readthedocs.io>

SDSS DR5, от медианно усредненных инструментальных звездных величин источников приведены на рис. 8. Мы исключили из выборки звезды, имеющие отклонение от линейной аппроксимации более 3σ , что составило около 15% от общего их количества. Для исключенных звезд слабее 15^m наши измерения показали завышенный блеск, что объясняется использованием метода апертурной фотометрии в плотных звездных полях. Яркие исключенные звезды либо находятся за пределами линейного диапазона ПЗС, либо расположены рядом с другой звездой, либо в каталоге Hartman et al. (2008) их блеск определен некорректно, что выяснилось после сравнения с данными обзора ZTF (Chen et al., 2020).

Параметры итоговых аппроксимаций:

$$r_{SDSS} = 0.986 r_{RoboPhot} + \text{const} \pm 0.022,$$

$$i_{SDSS} = 0.990 i_{RoboPhot} + \text{const} \pm 0.015.$$

Связь фотометрических систем RoboPhot и SDSS хорошо описывается линейными функциями с наклонами, близкими к единице; свободные коэффициенты зависят от экспозиции, радиуса апертуры и экстинкции первого порядка. Преобразованием к стандартной фотометрической системе можно пренебречь для большинства решаемых на телескопе задач.

5.2. Оценка общей пропускной способности

Мы оценили общую пропускную способность атмосферы, телескопа и фотометра, сравнив измеренные потоки в фильтрах r и i с ожидаемыми потоками, полученными на основе известных звездных величин звезд скопления M37. Найденные значения общей пропускной способности, 24% и 21%

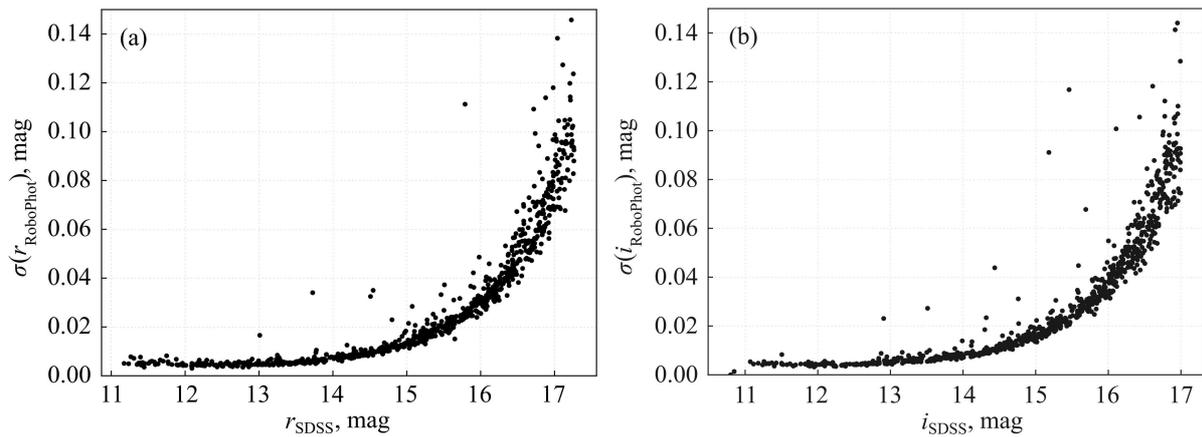


Рис. 9. Итоговая точность дифференциальной фотометрии для звезд скопления М 37 в r - и i -фильтрах с экспозицией 80 с (панели (а) и (b) соответственно).

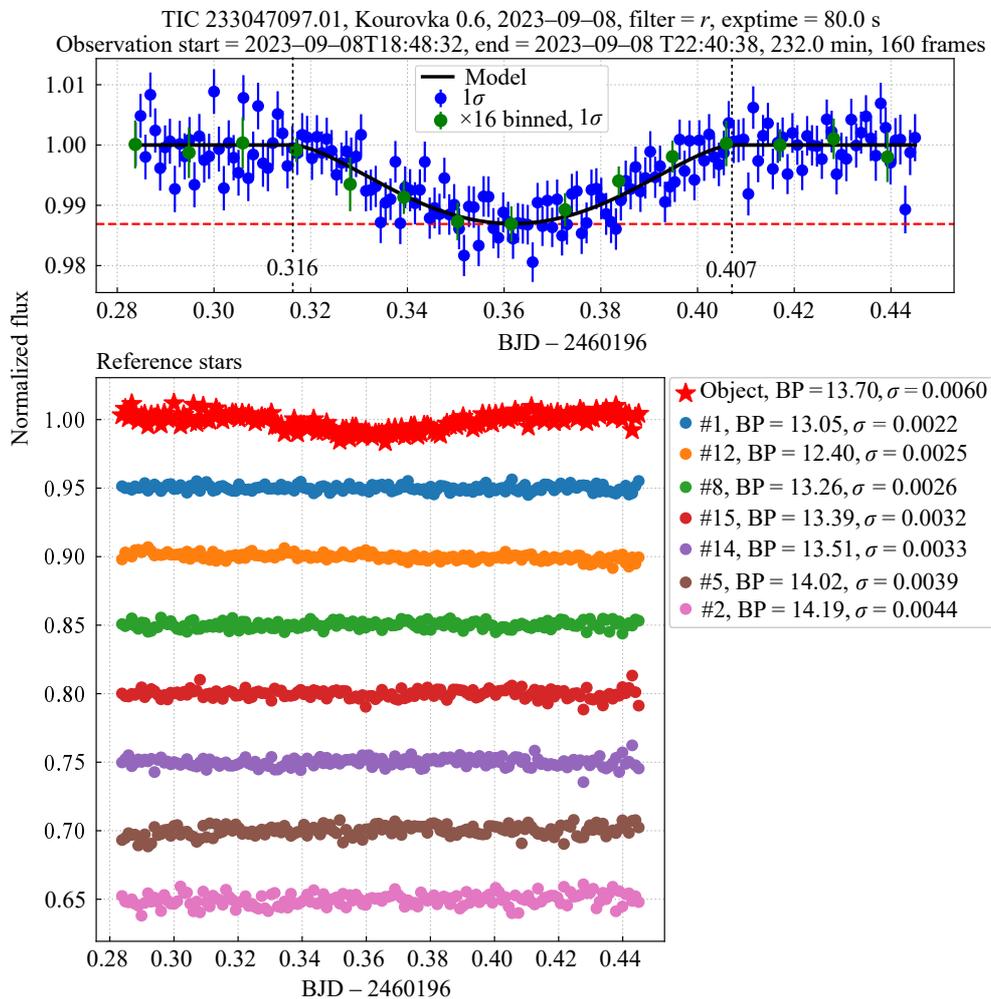


Рис. 10. Результат фотометрии TIC 233047097.01 и звезд сравнения в фильтре r . Синие точки — наблюдательные данные. Черной кривой показана модель транзита. Черные вертикальные пунктирные линии указывают точное модельное время начала и конца транзита. Зеленые точки усредняют 16 наблюдательных точек. Красной пунктирной линией показана расчетная глубина транзита.

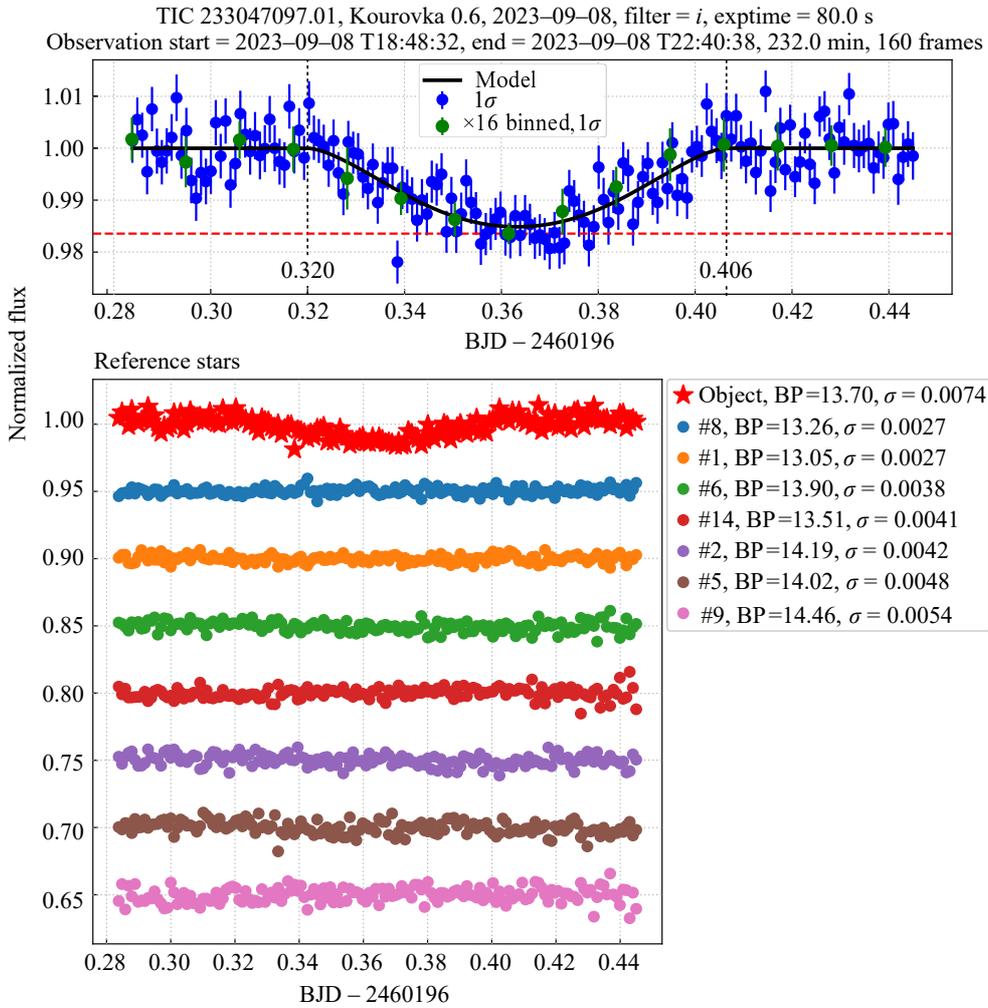


Рис. 11. То же, что на рис. 10, для фильтра *i*.

для *r* и *i* соответственно, оказались существенно ниже ожидаемых, особенно для полосы *r*. Мы объясняем это большим содержанием аэрозолей в атмосфере над КАО и деградацией отражающих покрытий зеркал телескопа RoboPhot. Для сравнения: общая пропускная способность в полосах *r* и *i* фотометра MuSCAT2 равна 33% и 22% соответственно (Narita et al., 2019).

5.3. Точность дифференциальной фотометрии

Дифференциальная фотометрия является основным методом наземных наблюдений транзитов экзопланет и единственным доступным на телескопе RoboPhot. Поэтому точность дифференциальной фотометрии является ключевым параметром телескопа, позволяющим оценить его применимость для наблюдений объектов из каталога TESS. На рис. 9 приведены зависимости СКО инструментальной звездной величины $\sigma(m)$ от стандартных звездных величин SDSS. Для большинства ярких звезд, $11 \leq m_{r,i} \leq 14$, СКО не превышает 0^m005 .

Каталог TOI (TESS Objects of Interest), используемый в проекте TESS, содержит данные о 1490 объектах с положительным склонением, глубиной транзита больше 0^m005 и статусом «планета», «кандидат в экзопланеты» или «сомнительный кандидат в экзопланеты», что подтверждает возможность использования RoboPhot в проекте ExoFOP-TESS наряду с другим телескопом Коуровской обсерватории — MASTER-Ural (Rodriguez et al. (2023)). TFOP (TESS Follow-up Observing Program⁶) состоит из пяти рабочих групп, каждая из которых решает свой набор задач. Малые наземные телескопы входят в первую рабочую группу и, имея существенно большее угловое разрешение, чем сам телескоп TESS, позволяют подтвердить или опровергнуть наличие транзитоподобных событий у объекта или ближайших звезд. Далее исключаются ложноположительные события, связанные с низкоамплитудными затменными

⁶<https://tess.mit.edu/followup/>

переменными звездами. Для прошедших проверку кандидатов уточняются эфемериды транзитов — время начала и конца транзита, продолжительность и глубина транзита.

6. ДЕМОНСТРАЦИЯ ТРАНЗИТНОЙ ФОТОМЕТРИИ

Первые полноценные наблюдения транзита экзопланеты на телескопе RoboPhot были проведены 8 сентября 2023 года. Мы наблюдали кандидата в экзопланеты TIC 233047097.01, который имеет блеск 13^m6 в полосе V ; период экзопланеты составляет 11^d3 , глубина транзита 13 mmag.

Продолжительность наблюдений составила 232 минуты, получено 160 кадров с экспозицией 80 с в двух фильтрах. Среднее $FWHM$ ФРТ $4''0$, фотометрия проводилась с апертурой $6''5$. СКО кривой блеска вне транзита составляет 0^m003 для фильтра i и 0^m002 для фильтра r . Отметим, что наблюдения проводились до ввода в систему управления программ коррекции гидирования (DONUTS) и автоматической фокусировки.

Результаты наблюдений прошли стандартную предобработку, описанную в Разделе 4. Далее выполнялась фотометрия в программе формирования отчета для TFOP, написанной нами для телескопа MASTER-Ural и дополненной для обработки наблюдений телескопа RoboPhot. Элементы отчета приведены на рис. 10 и 11. Для моделирования транзита использовался пакет PyTransit (Parviainen, 2015) и данные каталога TOI.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы представляем описание и результаты тестирования нового 60-см телескопа RoboPhot Коровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета. Основная задача телескопа — высокоточная многоцветная дифференциальная фотометрия астероидов и переменных звезд, прежде всего транзитов экзопланет. Телескоп имеет высокую степень автоматизации, что позволяет эффективно использовать относительно малое наблюдательное время КАО.

Оценка соответствия фотометрической системы телескопа системе SDSS показывает линейную зависимость с коэффициентом наклона, отличающимся от единицы не более чем на 0.035. Общая пропускная способность составляет 24% и 21% для фильтров r и i соответственно. СКО не превышает 0^m005 для большинства звезд ярче 14^m при экспозиции 80 с.

Приведен пример кривой блеска транзита кандидата в экзопланеты TIC 233047097.01 с блеском

13^m6 в полосе V и глубиной транзита 0^m013 . СКО кривой блеска вне транзита составляет 0^m003 для фильтра i и 0^m002 для фильтра r при экспозиции 80 с.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Артему Бурданову и Полу Боли за помощь в монтаже и тестировании телескопа RoboPhot.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FEUZ-2025-0003.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. Y. Burdanov, V. V. Krushinsky, and A. A. Popov, *Astrophysical Bulletin* **69** (3), 368 (2014). DOI:10.1134/S1990341314030122
2. X. Chen, S. Wang, L. Deng, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **249** (1), id. 18 (2020). DOI:10.3847/1538-4365/ab9cae
3. J. D. Hartman, B. S. Gaudi, M. J. Holman, et al., *Astrophys. J.* **675**, 1233 (2008). DOI:10.1086/527465
4. S. B. Howell, *Handbook of CCD Astronomy*, 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge, 2006).
5. V. G. Kornilov, V. M. Lipunov, E. S. Gorbovskey, et al., *Experimental Astronomy* **33** (1), 173 (2012). DOI:10.1007/s10686-011-9280-z
6. P. Kubánek, M. Jelínek, M. Nekola, et al., *AIP Conf. Ser.*, **727** 753 (2004).
7. J. McCormac, D. Pollacco, I. Skillen, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **125** (927), 548 (2013). DOI:10.1086/670940
8. N. Narita, A. Fukui, N. Kusakabe, et al., *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* **5**, id. 015001 (2019). DOI:10.1117/1.JATIS.5.1.015001
9. H. Parviainen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **450** (April), 3233 (2015). DOI:10.1093/mnras/stv894
10. A. E. Potoskuev, V. V. Busarev, V. V. Krushinskii, et al., *Solar System Research* **54** (5), 449 (2020). DOI:10.1134/S003809462005007X
11. K. Reif, K. Bagnschik, K. S. de Boer, et al., *SPIE Conf. Proc.*, **3649**, 109 (1999). DOI:10.1117/12.347066
12. G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, et al., *SPIE Conf. Proc.* **9143**, id. 914320 (2014). DOI:10.1117/12.2063489

13. J. E. Rodriguez, S. N. Quinn, A. Vanderburg, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **521** (2), 2765 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad595
14. D. L. Tucker, S. Kent, M. W. Richmond, et al., Astronomische Nachrichten **327** (9), 821 (2006).
15. S. Vach, G. Zhou, C. X. Huang, et al., Astron. J. **167** (5), id. 210 (2024). DOI:10.3847/1538-3881/ad3108

Robophot: 60-cm Robotic Telescope of Kourovka Astronomical Observatory, UrFU

N. A. Chazov¹, D. D. Tereshin¹, V. V. Krushinsky², A. A. Popov¹, and A. O. Zemlina¹

¹Ural Federal University, Kourovka Astronomical Observatory, Yekaterinburg, 620000 Russia

²Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, 620002 Russia

We present the results of the development and commissioning of the 60-cm RoboPhot telescope at the Kourovka Astronomical Observatory equipped with the TRIP three-channel photometer (Three-channel RoboPhot Imaging Photometer). The photometer is designed for simultaneous imaging in three bands of the SDSS photometric system: g , r , and i . Currently, it is equipped with only two CCD cameras with a resolution of 2048×2048 pixels, a field of view of $22' \times 22'$, and an image scale of $0''.65 \text{ pixel}^{-1}$. The primary objective of the telescope is high-precision multicolor differential photometry of asteroids and variable stars, particularly exoplanet transits. For stars with a magnitude of $13^m.5$, a differential photometry precision (rms) of 2.5 ppt in magnitudes is achieved with a 120^s exposure. The telescope is expected to become the leading instrument at the Kourovka Observatory for exoplanet studies and contribute to the TESS research program.

Keywords: *telescopes—instruments: photometers—exoplanets*